

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI  
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA  
KATEDRA OPTIKY



Univerzita Palackého  
v Olomouci

# **Optická homogenita germániových doštičiek**

Bakalárska práca

Autor: Veronika Vasiová

Študijný odbor: Digitálna a prístrojová optika

Dátum odovzdania: 12.5.2016

Olomouc 2016

## **Bibliografický identifikátor**

Meno a priezvisko autora: Veronika Vasiová

Inštitúcia: Univerzita Palackého v Olomouci  
Prírodovedecká fakulta  
17.listopadu 1192/12  
77146 Olomouc

Pracovisko: Katedra optiky

Študijný odbor: Digitálna a prístrojová optika

Názov práce: Optická homogenita germániových doštičiek

Vedúci práce: Dr. Ing. Zdeněk Řehoř

Počet strán: 44

Kľúčové slová: germánum, planparalelná doštička, polovodič,  
absorpcia, homogenita.

### **Abstrakt:**

Cieľom práce je rozpracovať metódu zisťovania optickej homogenity materiálu (planparalelných doštičiek z germánia) s využitím závislosti medzi rezistivitou (merným elektrickým odporom) a optickou homogenitou materiálu. V laboratórnych podmienkach overiť princíp tejto metódy.

## **Bibliographical identification**

Autor's first name and surname: Veronika Vasiová

School: University of palacky in Olomouc  
Faculty of Science  
17.listopadu 1192/12  
77146 Olomouc

Department: Department of optics

Title of thesis: The optical homogeneity of germanium wafers

Thesis consultant: Dr. Ing. Zdeněk Řehoř

Number of pages: 44

Keywords: germanium , a plane-parallel plate , semiconductor,  
absorption , homogeneity .

### **Abstract:**

The aim of the work is to develop a method for detecting the optical homogeneity of the material ( plane-parallel plates of Germany) using the dependence of resistivity (resistivity ) and optical homogeneity of the material. In the laboratory to verify the principle involved .

Prehlasujem, že som bakalársku prácu vytvorila samostatne pod vedením Dr. Ing. Řehoře s použitím literatúry, ktorú uvádzam v zozname.

V Olomouci dňa 12.5.2016

.....

## Podakovanie

Rada by som poďakovala Dr. Ing. Řehořovi za odborné rady pri meraní a za vypožičanie odbornej literatúry, z ktorej som čerpala. Ďalej by som chcela poďakovať spoločnosti Meopta s.r.o. za poskytnutie materiálov na meranie a pánovi RNDr. Vladimírovi Chlupovi a Šimonovi Demjenovi za ich pomoc pri meraní. Nakoniec by som chcela poďakovať pánovi Lukášovi Pozníčkovi za jeho rady a pomoc s programom Matlab.

# Obsah

Úvod .....	7
1. Polovodiče .....	8
1.1. Fyzikálne vlastnosti polovodičov .....	8
1.2. Polovodič typu P .....	9
1.3. Polovodič typu N .....	10
1.4. Vlastné polovodiče .....	11
1.5. Optické vlastnosti polovodičov .....	12
2. Infračervené spektrum .....	16
3. Germánium .....	17
3.1. Optické a elektrické parametre germánia .....	18
3.2. Absorpcia optického žiarenia germánia .....	19
4. Poruchy kryštalickej štruktúry .....	21
5. Praktická časť .....	22
5.1. Metóda použitá pri meraní .....	22
5.2. Popis a vyhodnotenie merania .....	23
5.3. Výsledky merania .....	25
5.3.1. Prvá planparalelná doštička .....	25
5.3.2. Vyleštená prvá vzorka .....	27
5.3.3. Tretia planparalelná doštička .....	30
5.3.4. Štvrtá planparalelná doštička .....	32
Záver .....	35
Použité zdroje a literatúra .....	37
Zoznam obrázkov .....	39
Zoznam tabuliek .....	40
Prílohy .....	41

# Úvod

Najpoužívanejším materiálom v elektronike či optoelektronike je germániu. Z tohto materiálu sú vyrábané nielen najrôznejšie elektronické komponenty, ale aj najrôznejšie optické členy určené najmä pre infračervenú oblasť (napr. v pásme 8-12  $\mu\text{m}$ ). Na ich vzniku a vývoji sa výrazne prejavuje technologický a najmä materiálový výskum, pri ktorom hlavné požiadavky výskumu sú čo najlepšia homogenita (nehomogenita) materiálov. Avšak na tento materiál sú kladené vysoké nároky na jeho kvalitu. Jedným z najdôležitejších požiadaviek je jeho homogenita.

Homogenita znamená rovnorodosť. Homogénny materiál tak zaisťuje konštantné vlastnosti materiálu v akomkoľvek mieste na materiály. Každá látka je jedinečná a popisovaná podľa svojich vlastností. Homogénne látky sú typické tým, že svoje vlastnosti (napr. farba, teplota, hustota) v celom svojom objeme nemenia. Odchýlku od týchto vlastností- nehomogenitu môžeme chápať ako odchýlku linearity daného materiálu.

Meranie homogenity je preto obzvlášť dôležité pri stanovení toho, či daný materiál je alebo nie je vhodný pre predpokladané využitie.

Táto bakalárska práca sa skladá z troch častí. Úvod práce je venovaný teoretickým znalostiam a vedomostiam o germániu a jeho štruktúre, všeobecným a optickým vlastnostiam. Na základe tohto sú opísané poruchy homogenity povrchu najprv všeobecne, neskôr na konkrétnom vzorku planparalelnej doštičky. V druhej časti je opis použitých metód merania. V závere popisujem praktické výsledky merania a vyhodnotenie homogenity daných vzoriek planparalelnej doštičky vyrobenej z germánia.

# 1. Polovodiče

Polovodiče sú látky, ktorých elektrická vodivosť je na hranici medzi vysokou vodivosťou kovov a malou elektrickou vodivosťou izolantov. Konkrétna hodnota elektrickej vodivosti je pritom veľmi variabilná a závisí od štruktúry látky, ale aj od vonkajších podmienkach. To znamená, že ich môžeme zmeniť dodaním niektorých z druhej energie, či už tepelnej, elektrickej alebo svetelnej. Zmena vnútorných podmienok predstavuje prímes iného prvku v polovodičoch. Väčšina polovodičov sú kryštalické látky, avšak existujú aj amorfné polovodiče (niektoré druhy skiel) [1].

Z fyzikálneho hľadiska polovodič je látka, u ktorej sa elektrický odpor znižuje s rastúcou teplotou a v závislosti na nej dosahuje hodnôt v rozsahu  $10^{-2}$  až  $10^8 \Omega$ . Avšak polovodiče netvorí žiadnu samostatnú a jasne vymedzenú skupinu látok [1] [4].

V polovodičoch môžeme rozlíšiť 2 základné typy vodivosti. Prvá, tzv. vlastná alebo aj intrinická vodivosť, ktorá je charakteristická pre čisté látky ako je napríklad kryštál kremíka a druhá, nevlastná, extrinická vodivosť, ktorá existuje najmä v obohatených polovodičoch o vhodný typ prímеси, poprípade je vyvolaná poruchami kryštalickej štruktúry alebo nečistotami, ktoré sú v polovodičoch obsiahnuté [6].

## 1.1. Fyzikálne vlastnosti polovodičov

Dokonalé monokryštaly polovodičov by sa chovali pri teplote absolútnej nuly ako izolátory. Vlastnosti polovodičov sa prejavujú až pri tepelnej excitácii a vplyvom prímеси alebo porúch kryštalickej mriežky. Polovodiče majú vodivosť elektrónovú, to znamená, že elektrický prúd je v nich prenášaný pomocou elektrónov a dier. Oproti kovom majú omnoho menšiu mernú elektrickú vodivosť, pretože obsahujú podstatne menej nosičov náboja v jednotke objemu [1] [4].



Charakteristickou vlastnosťou polovodičov je:

- Vo vlastnom vodiči elektrická vodivosť rastie exponenciálne s teplotou
- V polovodiči s prímiesou elektrická vodivosť silne závisí na koncentrácii prímiesí
- Elektrická vodivosť polovodičov závisí na osvetlení, dopadu elektrónov vysokých energií a na injekcií nosičov náboja z kontaktov
- Náboj sa môže prenášať elektrónmi, dierami alebo oboma druhmi nosičov zároveň podľa druhu dotovania nábojov [1].

## 1.2. Polovodič typu P

U polovodičov typu P je nahradený atóm polovodičového substrátu iným. V tomto prípade je spravidla nahradený atóm kryštálovej mriežky štvormocného prvku (Si) atómom trojmocného prvku. Po nahradení sa všetky tri jeho valenčné elektróny zúčastňujú väzieb s susednými atómami a štvrtá zostáva neúplná - vzniká diera. Analogicky k polovodiču typu P stačí malá energia k tomu (typická hodnota je asi 0,05 eV pre Si), aby sa niektoré z elektrónov zo susedných väzieb uvoľnili a zaplnili neúplnú väzbu trojmocného atómu - tzn. trojmocný atóm sa ionizuje záporne a vytvorí v susedstve „kladnú“ dieru (tzn. nedostatok jedného elektrónu). Táto diera sa môže pohybovať a umožniť tak vedenie prúdu (ak pôsobí na ňu vonkajšie elektrické pole). Trojmocné prímiesi sa nazývajú akceptory (prijímajú, alebo skôr sa dá povedať, že zachycujú elektróny z valenčného pásu) [1] [4] [6].



Obrázok 1: Pásová štruktúra polovodiča typu P [17]

### 1.3. Polovodič typu N

Polovodič tohto typu vzniká tým, že atóm kryštalickej mriežky štvormocného prvku je nahradený atómom päťmocného prvku. V tomto prípade jeho štyri elektróny vytvoria väzby so susednými atómami, piaty elektrón je nadbytočný a je viazaný k atómu len veľmi slabo. Tento elektrón preto môže byť veľmi ľahko uvoľnený dodaním veľmi malej energie, napríklad typická hodnota aktivačnej energie je približne 0,05 eV pre bežné prímеси v kremíku [1].

Každá prímесь má svoju typickú hodnotu aktivačnej energie. Túto energiu elektrón získa už pri nízkych teplotách, takže pri pokojovej teplote sú takmer všetky atómy prímеси ionizované. Vznikajú tak kladné ióny prímеси, ktoré zostávajú v mriežkových polohách, a voľné elektróny. Preto sa 5-mocne prímеси nazývajú donory ( dodávajú elektróny do vodivostného pásu) [1] [4] .

Donor sa prirodzene prejaví i v pásovom diagrame polovodičov. Pretože aktivačná energia je výrazne nižšia než u vlastného polovodiča, vytvárajú donorové atómy tzv. donorovú hladinu ( s energiou  $E_p$  ),ktorá sa nachádza v zakázanom pásme tesne pod vodivostným pásmo (  $E_c$  ). V polovodičoch typu N ( teda v polovodičoch s prevahou elektrónovej vodivosti ) majú prevahu elektróny ako nosiče nábojov, preto ich nazývame majoritné nosiče. Mimo týchto majoritných nosičov sa v polovodičoch uplatňuje i jeho vlastná vodivosť [4] [6].



Obrázok 2: Pásová štruktúra polovodiča typu N [17]

## 1.4. Vlastné polovodiče

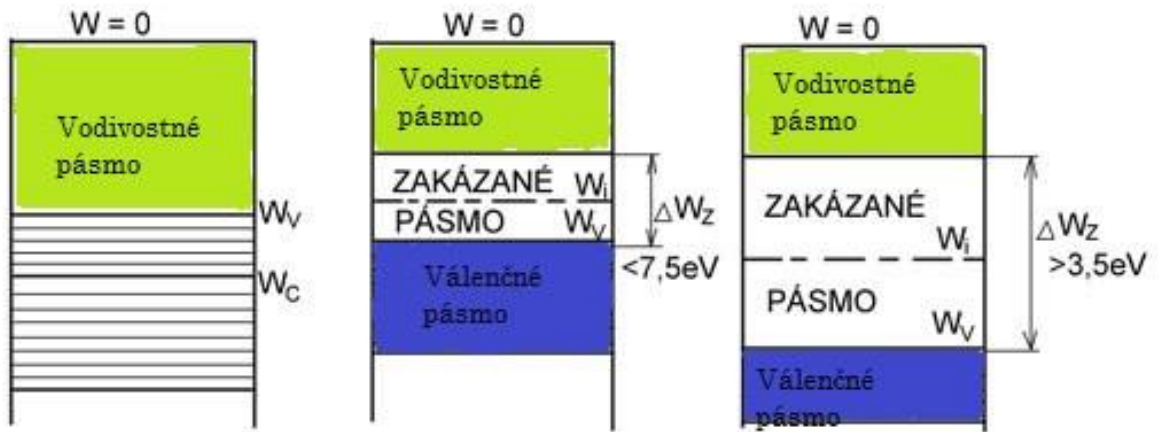
Dokonalý vlastný polovodič (dokonalý kryštál bez porúch a prímiesí) sa v prírode nevyskytuje. Pri dokonalej výrobe sa mu môžeme priblížiť. Vlastný polovodič sa podobá izolantu. Za teploty 0 K je vodivostný pás prázdny, to znamená, že v polovodiči nie sú žiadne voľné elektróny, ktoré by mohli viesť prúd. Vplyvom teploty alebo iného väčšieho vplyvu však môže elektrón získať dostatočnú energiu a prejsť do vodivostného pásu. Hovoríme o tzv. ionizácii polovodiča. K tomuto je potreba dostatočné množstvo tzv. ionizačnej energie (používa sa aj termín aktivačná energia), ktorá je potrebná k prekonaniu zakázaného pásu a k uvoľneniu elektrónu z väzby. Jej veľkosť musí byť najmenej  $E_G$  [1].

Uvoľnením elektrónu z väzby v atóme dochádza aj k vzniku kladnej virtuálnej častici- diery, ktorá sa nachádza vo valenčnom páse zdrojového atómu (ten sa chová ako kladný ión). Tento kladný ión sa môže zneutralizovať prijatím elektrónu, ktorý k nemu prejde zo susedného atómu. Susedný atóm si tak „požičia“, chýbajúci elektrón- diera sa pohybuje veľmi podobne ako skutočné reálne častice. Tým sa však z tohto susedného atómu stane kladný ión a môže byť opäť zneutralizovaný príchodom ďalšieho elektrónu. Pretože diera ako reálna častica neexistuje, je užitočné jej priradiť niektoré vlastnosti materiálnej častice (podobne ako má elektrón, ale opačný náboj  $+q$ , jej pohyb je opačným smerom ako pohyb elektrónov pri zhodnej rýchlosti) [1].

Vo vlastných polovodičoch môžu teda prenášať elektrický prúd za teploty nad 0K jednak voľné elektróny vo vodivostnom páse (každý elektrón prenáša náboj  $-q$ ), jednak pohyblivé diery vo valenčnom páse (náboj  $+q$ ). Pre oba tieto častice sa užíva názov nosiče náboja. Pretože súčasne vzniká voľný elektrón a pohyblivá diera je vo vlastnom polovodiči hustota elektrónov rovná hustote dier [1].

Proces uvoľňovania elektrónov pri ionizácii atómov nespôsobuje zmenu výsledného náboja daného objemu polovodiča (po uvoľnení elektrón zostáva v kryštálovej mriežke ionizovaný atóm s kladným nábojom). Vlastné polovodiče sú pri teplotách okolo 300 K vodiče elektrického prúdu. Vplyvom závislosti intrinzeckej koncentrácie na teplote aj ich vodivosť silne závisí na teplote [1] [4].

Zatiaľ čo pre výrobu polovodičových súčiastok sú využívané polovodiče s nevlastnou vodivosťou (typu P alebo typu N), tak pre výrobu optických súčiastok sú primárne využívané tzv. čisté (nedopované, vlastné) polovodiče [1] [4].



Obrázok 3: Pásmové modely pevných látok, a) vodič b) vlastný vodič c) izolant [18]

## 1.5. Optické vlastnosti polovodičov

Pri popise interakcie optického žiarenia s polovodičom sa veľmi často využíva popis prostredníctvom porovnávajúcich optických tokov pred a po interakcií. Pri tom sa predpokladá, že elektromagnetická vlna (optické žiarenie) nemaní energetické spektrum nosičov náboja, poprípade kryštalickej mriežky, ale iba vedie k vytváraniu nových párov elektrón - diera, alebo vyvoláva priestorové prerozdelenie nosičov náboja. Súčasne sa predpokladá, že optické vlastnosti prostredia (polovodiče) nezávisia na intenzite optického žiarenia. V tomto prípade hovoríme o lineárnom priblížení, teda lineárnej aproximácii. Ďalej predpokladajme, že vlnová dĺžka optického žiarenia je omnoho menšia než mriežková konštanta daného polovodiča, čo nám umožňuje zanedbať difrakčné javy v mriežke. Táto podmienka je spravidla pre bežný polovodič splnená do energií fotónov radovo niekoľko sto eV [1] [4].

Pre popis javov a interakcie u polovodičov najčastejšie kryštalickej sústave (kubická), poprípade v izotropných materiáloch obecné je využívaný koeficient extinkcie (útlmu)  $\kappa$  a index lomu  $n$ . Pre lepšie porozumenie ich väzieb na mikroskopické vlastnosti látok sa preto najprv podrobnejšie pozrieme na obecný prípad šírenia rovinnéj elektromagnetickej vlny dopadajúcej na rovinné rozhranie s polovodičom [1] [4].

Označme  $E, D$  vektory intenzity a indukcie elektrickej zložky elektromagnetického žiarenia a  $H, B$  vektory intenzity a indukcie magnetickej zložky elektromagnetického žiarenia. Maxwellové rovnice popisujúce predpokladanú vlnu a majú tvar [1] :

$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \delta \frac{B}{\delta t}, \quad (1.)$$

$$\operatorname{rot} H = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\delta D}{\delta t},$$

$$\operatorname{div} D = 0,$$

$$\operatorname{div} B = 0.$$

Pričom  $\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$ ,  $\epsilon_0 = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ , kde  $\sigma_1, \sigma_2, \epsilon_1, \epsilon_2$  sú materiálové veličiny, ktoré závisia na frekvencii dopadajúcej vlny  $\omega$ . Takisto predpokladajme, že magnetická priepustnosť  $\mu$  nezávisí na  $\omega$ . V nemagnetických polovodičoch je ich hodnota veľmi blízka jednej.

Miesto koeficientu extinkcie sa často používa koeficient útlmu  $\alpha$  určený vzťahom [1] :

$$\alpha = \frac{2\omega}{c} \kappa = \frac{4\pi V}{c} \kappa. \quad (2.)$$

Fyzikálny význam koeficientu útlmu  $\alpha$  je zrejmý, keď si uvedomíme, že hustota energie elektromagnetickej vlny je úmerný jej amplitúde. To znamená, že súčasne s tým klesá i počet fotónov v jednotkovom objeme. Prevrátená hodnota  $\alpha$  je rovná dĺžke, na ktorej sa hustota energie vlny zmenší  $e$ -krát.

Závislosť medzi koeficientom extinkcie a útlmu vychádza z vzťahu [1] :

$$\kappa = \frac{\alpha \lambda}{4\pi}, \quad (3.)$$

kde  $\lambda = 2\pi \frac{c}{\omega}$  je vlnová dĺžka dopadajúcej vlny vo vákuu.

V súlade s prijatými predpokladmi je ako u koeficientu extinkcie reálna aj imaginárna časť  $\varepsilon$  a  $\sigma$  rôzna od nuly v prípade, že nie je nulová ani ich imaginárna časť. V prípade nepohlcujúceho prostredia kedy  $\sigma_1 = \varepsilon_2 = 0$ , dosadíme do vzťahu pre index lomu [1] :

$$n = \sqrt{\mu \varepsilon_1'} . \quad (4.)$$

Tento vzťah predstavuje Maxwellovu rovnicu pre index lomu doplnenú o závislosť na  $\varepsilon_1$ .

V prípade slabo pohlcujúceho prostredia, pre  $\varepsilon_1' > 0$ , a pre dostatočne veľkú frekvenciu  $\omega$  za predpokladu, že  $\varepsilon_1' \gg \varepsilon_2'$  dostávame pre koeficient útlmu vzťah [1] :

$$\alpha = \frac{4\pi \sigma_1' \mu^{\frac{1}{2}}}{c (\varepsilon_1')^{\frac{1}{2}}} , \quad (5.)$$

pričom vlnová dĺžka v prostredí je daná vzťahom  $\lambda = 2\pi c / n\omega$ . S využitím tohto vzťahu sa dá ľahko odvodiť vzťah [1] :

$$\alpha^{-1} \gg \frac{\lambda}{2\pi} . \quad (6.)$$

Vzdialenosť, ktorú je elektromagnetická vlna schopná absorbovať, je potom omnoho väčšia ako jej vlnová dĺžka [1] [4].

Podmienka  $\varepsilon_2' > 0$  a predchádzajúca nerovnosť je východiskové pre celú radu prípadov. Pritom vplyv voľných nosičov náboja na priepustnosť dielektrika je spravidla malý pre uvažovaný rozsah frekvencie i útlmu na mriežke: tzn.  $\varepsilon_1' \approx \varepsilon_1$  a  $\varepsilon_2 \ll 1$ . Potom za predpokladu, že  $\mu=1$  sa dá vzťah upraviť [1] :

$$\alpha = \frac{4\pi \sigma_1}{c \varepsilon_0^{1/2}} . \quad (7.)$$

Experimentálne je veľmi často určovaný aj koeficient reflektancie (odrazivosti) daný vzťahom [1] :

$$R = \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} . \quad (8.)$$

V tomto vzťahu je  $E_i$  amplitúda dopadajúcej vlny na rozhraní polovodiča a  $E_r$  amplitúda odrazenej vlny. S využitím vyššie uvedených hraničných podmienok možno vyjadriť  $R$  prostredníctvom koeficientu extinkcie a indexu lomu v tvare [1] :

$$R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2} \quad (9.)$$

Kryštalické pevné látky, sú látky, ktorých atómy sú usporiadané do pravidelne sa opakujúcej štruktúry nazývanej kryštalová mriežka.

Prenikajúca elektromagnetická vlna bezprostredne budí kmity mriežky. Tento mechanizmus absorpcií má veľký vplyv v iontových kryštáloch, v ktorých vplyvom následnej degenerácie optických fotónov dochádza k zmene vektorov polarizácie. Nedá sa ich zanedbať ani u homeopolárných kryštálov. Tento typ útlmu spravidla vyvolávajú vlny, ktorých frekvencia je blízka vlastnej frekvencií fotónov  $\omega_0$  [1] [4].

Na polovodič zložený z atómov rôzneho druhu sa dá pozeráť ako na súbor elektrických dipólov. Takéto dipóly môžu pohlcovať energiu elektromagnetického poľa. Najväčší vplyv majú tieto dipóly v prípade, že frekvencia prestupujúceho elektromagnetického poľa je blízka alebo rovná frekvencií vlastných kmitov dipólu. S ohľadom na hodnoty vlastných frekvencií mriežky tomu odpovedá vzdialená infračervená oblasť [4].

V homeopolárných oblastiach (kryštáloch), kde zjednodušene na dipóly sa nedá prijať (dipólové momenty neexistujú), je útlm na mriežke aj tak pozorovateľný. Evidentne u nich dochádza k inému procesu. Postupujúce žiarenie indukuje dipól, ktorý následne silne interaguje so žiarením za vzniku fotónov. Pretože je indukovaný dipól budený samotným polom, je i jeho frekvencia tomuto poli blízka. Preto vzájomná interakcia je takisto veľmi silná [1].

Z uvedeného je zrejmá súvislosť medzi optickými vlastnosťami (absorpcie, poprípade priepustnosti materiálu), elektrickými vlastnosťami (vodivosť, poprípade elektrický odpor) a jeho homogenitou. Prípadná prítomnosť porúch kryštalickej štruktúry alebo nečistôt ( tzn. narušenie homogenity) lokálne ovplyvňuje optické i elektrické vlastností materiálu [1] [4].

## 2. Infračervené spektrum

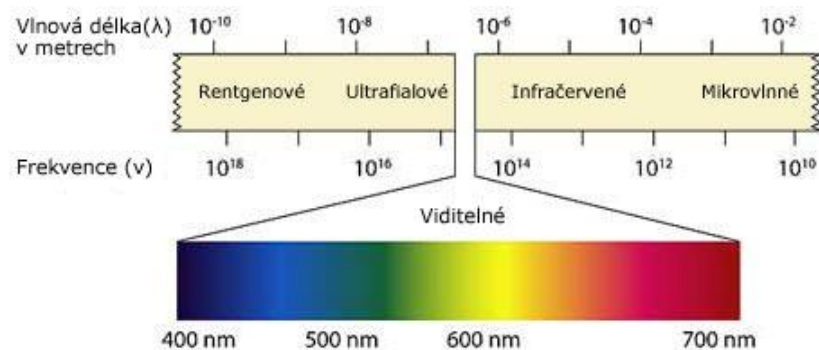
Infračervené žiarenie je elektromagnetické žiarenie, ktorého vlnová dĺžka je väčšia ako viditeľné svetlo. Jeho vlnová dĺžka sa rozprestiera medzi 760 nm až 1mm. Ak použijeme energiu fotónov, potom infračervené spektrum sa rozprestiera medzi 0,0012 eV až 1,63 eV [14].

Objavitel'om infračerveného žiarenia sa považuje William Herschel, ktorý v roku 1800 meral teploty v oblastiach patriacej k červenej oblasti spektra [14].

Infračervené žiarenie sa ďalej delí:

- NIR (near infrared), ktorého vlnová dĺžka je 0,76-1,4  $\mu\text{m}$ . Často sa používa v telekomunikáciách.
- SWIR (short wave), s vlnovou dĺžkou 1,4-3  $\mu\text{m}$ .
- MWIR (medium wave), vlnová dĺžka 3-8  $\mu\text{m}$
- LWIR (long wave), vlnová dĺžka 8-15  $\mu\text{m}$

Hranice medzi IR spektrom a viditeľným žiarením nie je presne ohraničená, nakoľko je to závislé na citlivosti ľudského oka [13] [14].



Obrázok 4: Spektrum svetla [12]



### 3. Germánium

Na Zemi sa nachádza veľa druhov optických materiálov, avšak len málo z nich je použiteľná do IR spektra.

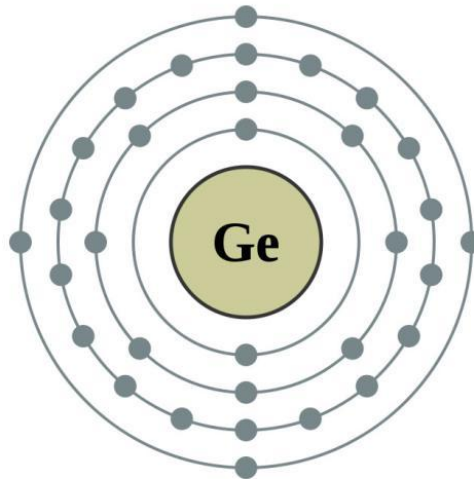
Najpoužívanejším z týchto materiálov sa považuje germánium, ktorý sa obvykle nachádza v prímiesiach v rudách zinku alebo striebra. V zemskej kôre je veľmi vzácnym prvkom. Priemerný obsah germánia v zemskej kôre je 5-7 mg/kg. V morskej vode je jeho koncentrácia ešte nižšia, okolo 0,07 mikrogramu na jeden liter. Popri tom germánium je netoxické a má dobrú tepelnú vodivosť [2] [3].

Germánium je kryštalický polovodičový materiál, ktorý sa veľmi často využíva v polovodičovom priemysle [5].

V 50. rokoch minulého storočia nastal prvý záujem o germánium, kedy bol skonštruovaný prvý tranzistor, v ktorom bolo použité čisté germánium. Neskôr bolo germánium nahradené kremíkom, ktorý sa v prírode vyskytuje častejšie, avšak germánium sa naďalej využíva na výrobu mimo iného aj detekčných polovodičových diód. V súčasnosti sa používa ako zlúčenina germanid kremíka (SiGe) na výrobu integrovaných obvodov. Takisto sa používa na výrobu obvodov, ktoré sú citlivé na elektromagnetické vlnenie v infračervenej oblasti spektra, preto sa využíval v rádiovej technike. V súčasnosti má široké využitie v optike pri výrobe optických vlákien, pretože podstatným spôsobom zvyšuje index lomu materiálu [2].

Pre jeho dobré vlastnosti v IR spektre sa germánium používa aj v infračervených prístrojoch (kamery pre nočné videnie či kamery v jadrových elektrárnach) alebo optických súčiastkach ako sú šošovky pre kamery so širokým uhlom záberu. Ako jeden z mála materiálov je využiteľný nielen v MWIR ale aj v LWIR sfére IR spektra [2] [3] [5].

Okrem iného mení vlastnosti niektorých kovov, napríklad teplotu topenia zlata dokáže znížiť z 1060° C až na 356°C. Preto túto vlastnosť sa táto zliatina používa ako tzv. klenotnícka pájka [20].



Obrázok 5: Rozloženie elektrónov v germániu [11]

### 3.1. Optické a elektrické parametre germánia

Germánium okrem iného má vynikajúce optické vlastnosti, z ktorých dva sú významné.

Prvý z nich je index lomu. Jeho hodnota je vyššia ako 4,0, čo znamená, že je omnoho jednoduchšie znižovať aberácie. Vďaka tomu má nízky rozptyl svetla, ktoré zabránia aj farebným vadám. Táto vlastnosť je významná nielen pre návrhárov optických systémov. Vďaka kombinácii vysokého indexu lomu a nízkej disperzií je možné pomocou nej navrhnuť optickú sústavu s nízkym clonovým číslom [2] [3].

Druhý je parameter  $dn/dt$ , ktorý predstavuje zmenu indexu lomu v závislosti na teplote. Parameter  $dn/dt$  pre germánium má hodnotu  $3,96 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Jeho hodnota je omnoho vyššia v porovnaní s obyčajným sklom ako BK7, ktorého hodnota je  $3,60 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  [2] [3].

Z elektrických vlastností je zaujímavá šírka zakázaného pásu. U germánia je táto hodnota 0,78 eV. Na porovnanie u kremíka, ktorý má podobné vlastnosti je šírka zakázaného pásu až 1,11 eV [5].

Ďalšou vlastnosťou je tzv. kritická teplota. Aby elektrón mal dostatočnú energiu k prekonaniu zakázaného pásma, potrebuje dosiahnuť práve túto hodnotu. Germániu sa potom stáva vodivým. Kritická teplota je tým väčšia, čím je väčšia šírka zakázaného pásma. Kritická teplota u germánia je 90°C. Pre porovnanie u kremíka je až 155°C [5].

Z elektromagnetických vlastností je dôležitý merný elektrický odpor. U germánia táto hodnota dosahuje až 1Ωm pri 20°C. Štandardný elektródový potenciál má hodnotu 0,247 V. Pre porovnanie merný elektrický odpor kremíka dosahuje hodnôt v priemere 2300 Ωm pri 20°C a jeho štandardný elektródový potenciál dosahuje hodnôt približne 1,12 V [5].

## **3.2. Absorpcia optického žiarenia germánia**

Germániu má štruktúru diamantu, v ktorom každý atóm je obklopený štyrmi susednými atómami, ku ktorým je viazaný kovalentný elektrón. Tieto častice sú zviazané s okolnými atómami prostredníctvom väzieb, preto tieto častice majú svoje pevné miesta. Sú to rovnovážne polohy, v ktorých výsledná sila pôsobiaca na častice je nulová. Okolo týchto rovnovážnych polôh častice konajú kmitavý pohyb. Ich amplitúda a frekvencia závisia na vzájomných silách, ktorými jednotlivé častice na seba pôsobia. Absorpcia sa zvyšuje s rastúcou teplotou [3].

Bez nosičov náboja ( elektrónov a dier), môže dôjsť k absorpcii v celej transparentnej oblasti infračerveného spektra. Výnimkou sú vnútorné absorpčné procesy vytvorené dotovaním na výrobu n-typu alebo p-typu materiálu. Diery v germániu dokážu absorbovať viac energie než elektrón, čím vytvára väčšiu absorpciu. Pre vnútorne neutrálne germániu musí platiť počet otvorov násobený počtom elektrónov je konštantný. Znížením počtu dier dochádza k zvýšeniu počtu elektrónov pridaním skupiny atómov k donoru, pričom vzniká nižší odpor materiálu. Avšak nadmerný prídavok vedie k vyššej koncentrácii elektrónov a následnému zvýšeniu absorpcie. Z tohto dôvodu dosiahnutie vysokej optickej kvality germánia je kompromisom medzi úrovňami prímiesi a sústredením dier [3].

Germánium nie je obvykle používané pri vysokých teplotách z dôvodu nadmernej absorpcie spôsobené zvýšením počtu tepelne vytvorených dier. Avšak doping vhodných prímiesí k zníženiu n-tytového merného odporu môže byť užitočný pri teplotách až 80° C [3].



Obrázok 6: Spektrálna závislosť germánia (T- vnútorná priepustnosť) [21]

## 4. Poruchy kryštalickej štruktúry

Pri poruchách pravidelnosti v kryštalickej mriežke sa môžu prejavovať prímесové hladiny, a to tým, že zvýšia vodivosť. Pri výrobe polovodičových prvkov je tento jav nežiaduci. Bohužiaľ, ide o ťažko kontrolovateľný jav. Pri rozsiahlych poruchách sa základne polovodičové vlastnosti môžu viac či menej zmeniť, poprípade až úplne stratiť. Niektoré polovodiče sa potom správajú ako izolanty a aj ako vodiče. Pri meraní homogenity materiálov sa tieto chyby dajú eliminovať alebo úplne odstrániť [1] [4].

Prítomnosť nečistôt má vplyv na rôzne nehomogenity v látke. Napríklad vplyvom nenulové absolútnej teploty dochádza k vzniku odchýlok polôh jednotlivých prvkov kryštálu, či už sa jedná o jednotlivé častice alebo celé elementárne bunky. Výsledkom sú poruchy kryštálovej mriežky [1] [4].

V polovodičoch na báze kryštálu, ktoré sa používajú v elektronike sa najčastejšie vyskytujú bodové poruchy, z ktorých najčastejšia je vakancia. Vakancia nastane vtedy, keď atóm opustí svoje miesto v kryštálovej mriežke a miesto po ňom ostane prázdne. Tento atóm potom môže ostať v medziatómovom priestore. Obvykle je zachytený medzi uzly kryštalickej mriežky alebo môže preniknúť až na povrch kryštálu [1] [4].

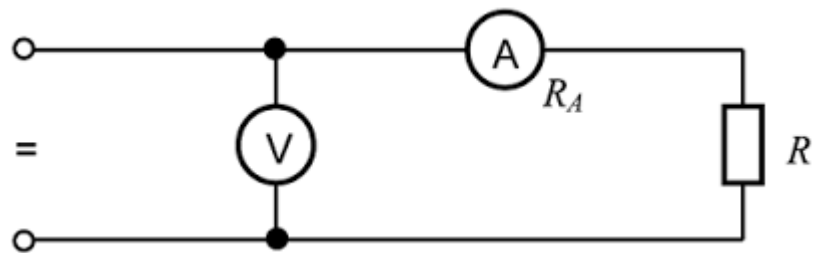
Mimo iné existujú aj čiarové a plošné poruchy. Čiarové poruchy vznikajú vtedy, keď je časť alebo celá jedna rovina v mriežke navyše. Plošné roviny vznikajú najčastejšie posuvom alebo sklzom susedných rovín [1] [4].

Za poruchy kryštálovej mriežky sa takisto považujú aj vlastné tepelné pohyby jednotlivých atómov v rámci ich stredových polôh v kryštálovej mriežke. Keďže elektróny sú viac ako tisíckrát ľahšie než atómové jadra môžeme sledovať relatívne pomalé pohyby atómových jadier. V porovnaní s medziatómovými vzdialenosťami vo vnútri kryštálu sú amplitúdy kmitov veľmi malé. Preto pre vlastný popis kmitov môžeme využiť rovnakého popisu ako popis vlnovej funkcie elektrónov [1] [4].

## 5. Praktická časť

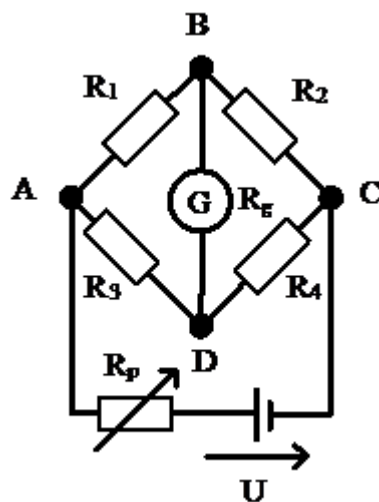
### 5.1. Metóda použitá pri meraní

Metóda použitá v tejto práci je založená na meraní malých merných odporov daného materiálu. Pri prvom meraní bola využitá voltampérovou metódou, ktorá sa považuje za najuniverzálnejšiu metódu merania ohmických odporov. S touto metódou sa dajú merať nielen veľmi malé hodnoty odporov, ale aj veľmi veľkých. Malé hodnoty respektíve malé odpory sú chápane ako odpory, ktorých hodnota je mnohonásobne menšia ako vnútorný odpor voltmetra, a naopak pri veľkých odporov je vnútorný odpor voltmetra zrovnateľný alebo väčší. Výhodou tejto metódy je meranie v ľubovoľnom bode ale aj plošné meranie, poprípade celú charakteristiku [7] [8] [9] [10].



Obrázok 7: Schéma merania pomocou voltampérovej metódy[16]

Pri ďalšom porovnávacom meraní bola použitá metóda merania ohmických odporov pomocou Wheatsonova mostíka. Táto metóda sa najčastejšie používa na meranie odporov v rozsahu 1 až 100 k $\Omega$ . Wheatsonov mostík pozostáva zo štyroch odporov, z ktorých jeden je neznámi, a práve tu je umiestnená vzorka materiálu [7] [9] [10].



Obrázok 8: Schéma merania pomocou Wheatsonovho mostíku [15]

## 5.2. Popis a vyhodnotenie merania

Merací prístroj bol pevne ukotvený na stabilizovanom pracovnom stole, aby všetky nežiaduce vibrácie boli eliminované. Na tom bol ukotvený krížový posuvný stolík, ktorý sa dal posúvať podľa osy XY v horizontálnej rovine pomocou mikroposuvu s odpočtom. Pri meraní som zvolila posun osi X o 1 mm a posun osi Y o 5 mm. Na otočnom stolíku bola ukotvená podložka, na ktorú sa pevne pripevňovali doštičky germánia. Z vrchu na planoparalelnú doštičku sa prikladal merací snímač. Vlastný kontakt s materiálom zaisťovali zlaté elektródy s guľovým hrotom a automatickým konštantným prítlakom. Na tom bol napojený ampérmeter.

Pri meraní pomocou Wheatsonovho mostíka sa ešte z boku pripojovala podložka, na ktorej bol zapojený mostík. Tento kontakt bol pevne pripevnený na pracovnom stole.

V laboratóriu som sa snažila udržiavať stálu teplotu, aby tým výsledky neboli ovplyvňované a eliminovať chyby pri meraní.

Kontrolné meranie bolo realizované pomocou infračervenej kamery. Táto kamera bola v špeciálnom laboratóriu. Tento prístroj mal už v sebe zabudované nástroje na elimináciu otrasov, či chýb merania. Doštička sa do stroja vložila a prístroj automaticky odmeral germániovú doštičku.

Pre prepočet výsledkov merania boli použité vzťahy, ktoré boli zmienené v kapitole 1.5. Pri prepočte merného odporu sa používal vzťah [19] :

$$\rho_m = \frac{\rho}{x}, \quad (10.)$$

kde  $\rho$  sú namerané hodnoty odporu germániových doštičiek,  $x$  je vzdialenosť meracích hrotov (určená z koordinátu  $[X, Y]$  mikroposuvom).

Tento vzťah sa používal pri meraní voltamperovou metódou, kedy sme mali 2 meracie elektródy, z ktorých jedna bola pevná a druhá posuvná. [19]

Ďalší vzťah použitý [19] :

$$\delta_m = \frac{1}{\rho_m}. \quad (11.)$$

Z tohto vzťahu plynie, že absorpcia  $A(\lambda)$  je závislá na vodivosti (viď. kapitola 1,5). Predpokladajme ďalej, že vo východiskovom bode sú potom vlastnosti ekvivalentné.

Pre následné vyhodnotenie a vzájomné porovnanie merania pomocou elektrických metód a pomocou IR kamery je zavedená normalizácia [19] :

$$\delta_n = \frac{\delta_m}{\delta_{m \max}}. \quad (12.)$$

Čím väčší je merný odpor, tým menšia je lokálna vodivosť danej látky a tým väčší je lokálny elektrický prúd, pričom merný odpor klesá s teplotou exponenciálnym spôsobom.

Obdobne pre normovanie hodnôt jasovej stopy [19] :

$$E = \frac{E_T}{E_{T \max}}, \quad (13.)$$

kde  $E_T$  sú namerané hodnoty jasovej stopy cez IR kameru.

Z tohto vzťahu plynie:  $E \sim f(\alpha) \sim f(A)$ ,  $A$  je priepustnosť svetla. [19]

Pre celkové vyhodnotenie miery nehomogenity potom je možné využiť smerodajnú odchýlku (poprípade inú štatistickú veličinu), vypočítanú z nameraných hodnôt jednotlivých meraní:

$$s = \sqrt{\left(\frac{1}{N-1}\right) \sum_{i=1}^N \delta_i^2 - N\bar{\delta}^2}. \quad (14.)$$



V prípade dokonalej homogenej doštičky (všetky merané body vykazujú zhodnú hodnotu vodivosti/ priepustnosti) je hodnota smerodajnej odchýlky rovná nule. S rastúcou hodnotou s rastie aj nehomogenita materiálu.

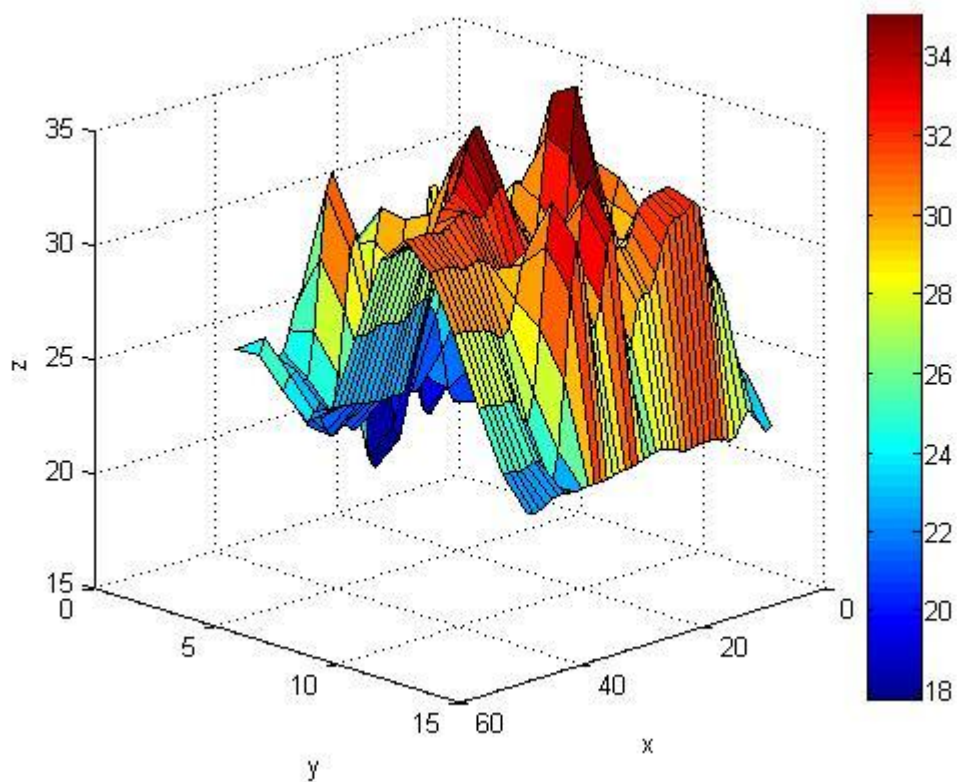
## **5.3. Výsledky merania**

V praktickej časti som merala niekoľko druhov germániových doštičiek, od nevyleštené cez dokonale vyleštené, od štvorcových tvarov až po guľaté.

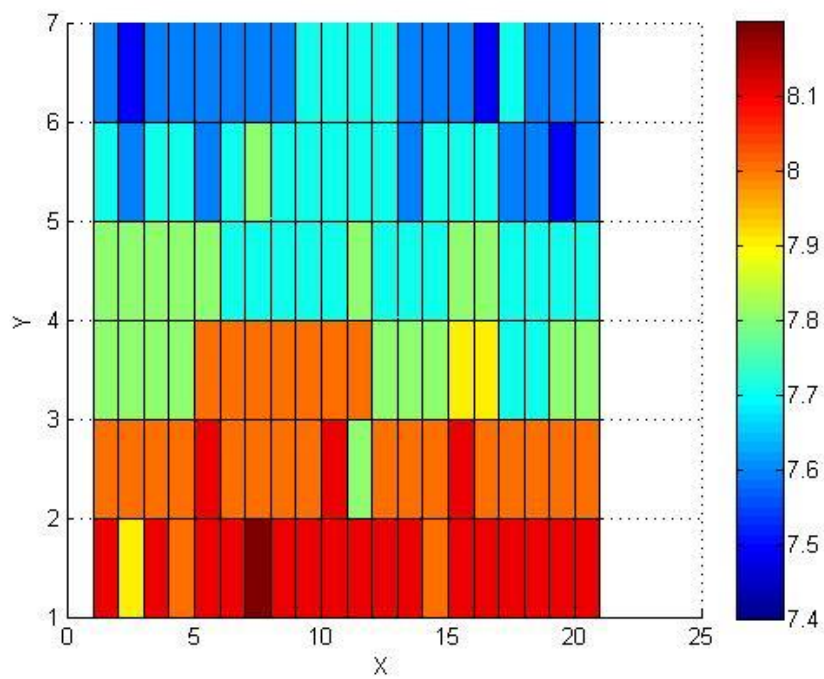
Testované boli štyri vzorky germániových doštičiek. Prvá vzorka bola rez ingotom germánia určeného k výrobe elektronických súčiastok bez akéhokoľvek opracovania. Táto vzorka sa potom preleštila a opätovne premerala. Tretia a štvrtá vzorka predstavuje germánium spracované do planparalelných doštičiek určených pre výrobu optických komponentov. Tretia vzorka predstavovala surový, nevyleštený materiál. Posledná vzorka bola už vyleštená.

### **5.3.1. Prvá planparalelná doštička**

Prvá germániová doštička bola zo surového materiálu, neopracovaná a nevyleštená. Bola pevne ukotvená na vodivú podložku. Táto doštička bola zapojená pomocou vyššie popísaných metód. S meracím prístrojom sa bodovo premeriavala celá plocha. Z výsledkov merania vyplýva, že planparalelná nevyleštená doštička germánia má najväčšiu homogenitu približne v strede meranej plochy. Čím viac sa meranie približovalo k okrajom, tým viac sa začala prejavovať nehomogenita plochy.



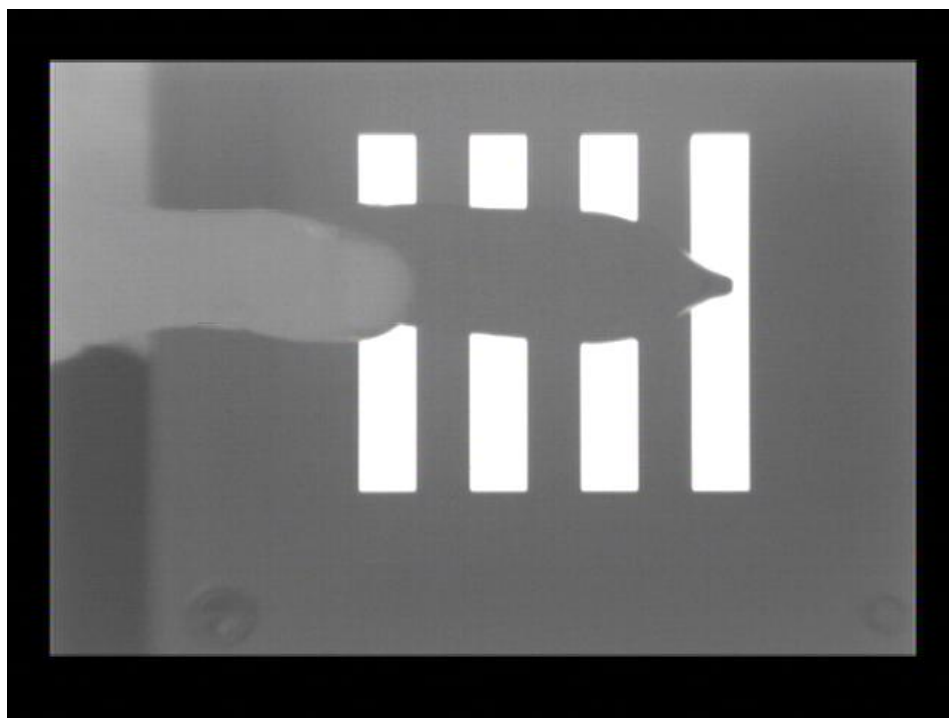
**Obrázok 9: 3D znázornenie nameraných hodnôt 1. vzorky germánia**



**Obrázok 10: 2D znázornenie nameraných hodnôt 1. vzorky germánia**

Prvá vzorka- germánium určené pre elektrické súčiastky bolo pre meranie pomocou IR nepriepustné. Išlo pravdepodobne o vplyv prímеси v tomto vzorku. Táto vzorka s ohľadom na zjavné nehomogenity nie je pre výrobu optických komponentov vhodná.

Táto doštička mala najvyššiu nehomogenitu a absorpciu. Prepúšťala minimálne množstvo svetelnej energie, preto nie je vhodná na výrobu polovodičových prvkov. Obsahovala veľa prímеси, preto vykazovala veľké odchýlky merania a veľmi ťažko sa s ňou manipulovalo.

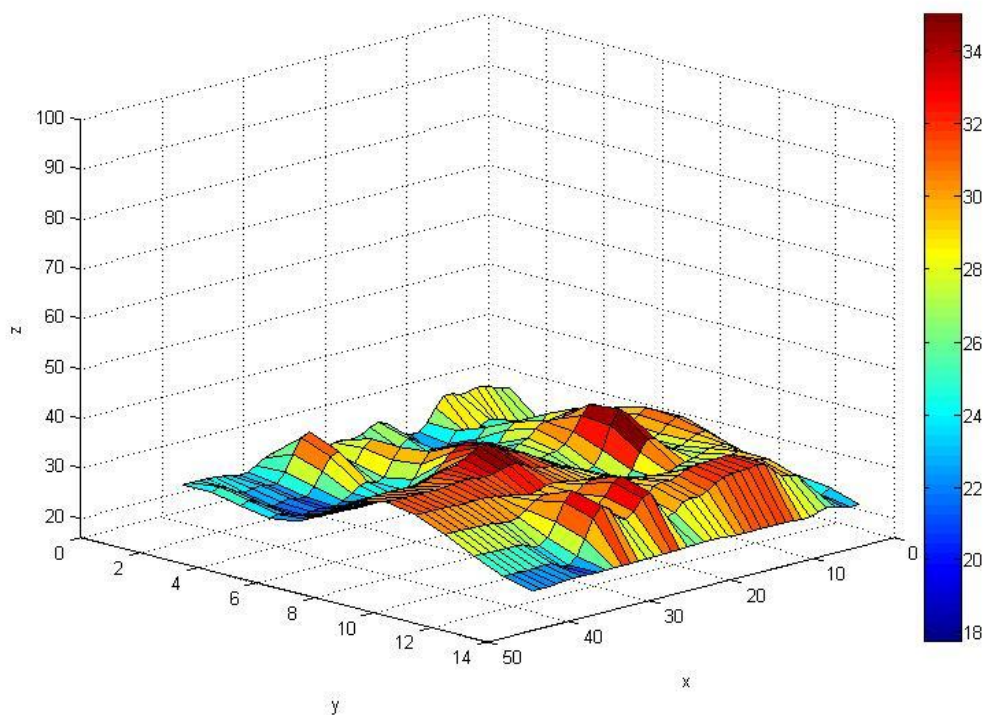


Obrázok 11: 1. vzorka germánia cez infračervenú kameru

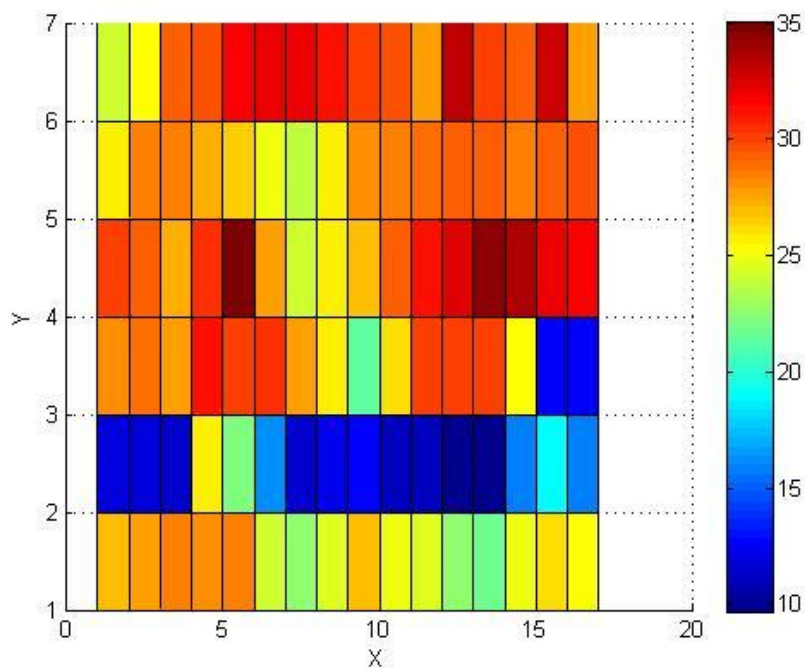
### 5.3.2. Vyleštená prvá vzorka

V druhej časti merania sa použila vyleštená totožná planparalelná doštička germánia. Pri rovnakom zapojení sa zmerala bodovo po celej ploche. Táto doštička vykazovala lepšie hodnoty homogenity ako doštička prvá, avšak obsahovala veľa prímеси, preto výsledky merania vykazujú veľké odchýlky. Najviac nehomogenity u germánia pre

elektronické súčiastky býva na okraji a na povrchu. Leštením boli tieto povrchové poruchy odstránené.

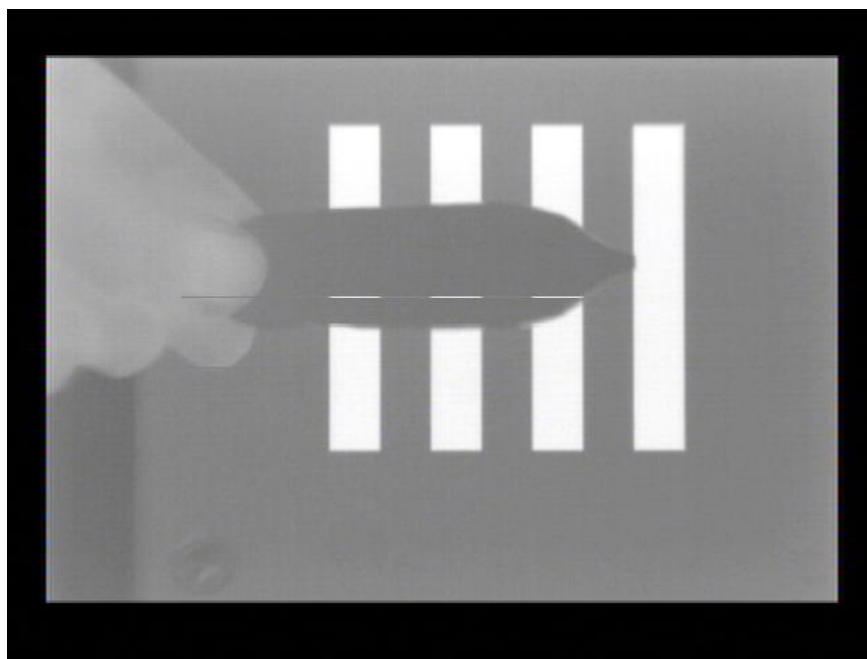


**Obrázok 12: 3D znázornenie nameraných hodnôt 2. vzorky germánia**

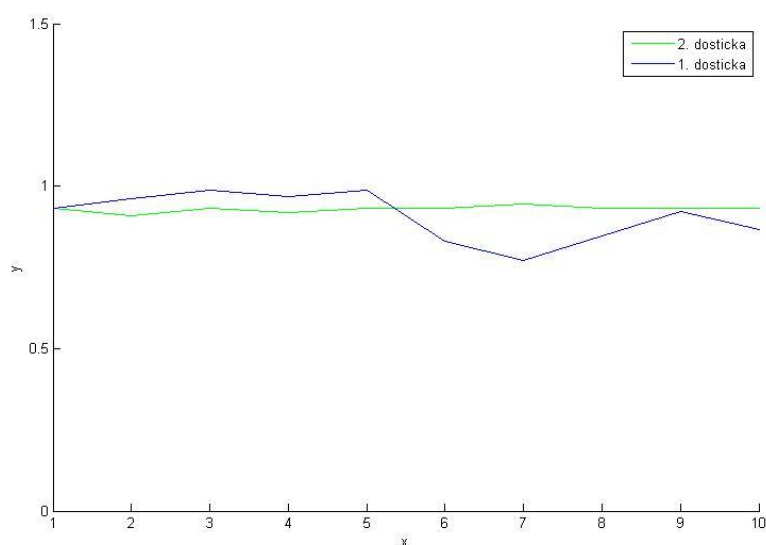


**Obrázok 13: 2D znázornenie nameraných hodnôt 2. vzorky germánia**

Pri kontrolnom optickom meraní v IR oblasti nebolo opäť možné zmerať doštičku kvôli prímiesiach v materiály (materiál nebol dostatočne priepustný). Doštička už bola vyleštená, avšak ešte stále hodnoty absorpcie neboli dostačujúce, doštička vykazovala veľkú nehomogenitu a absorpciu.



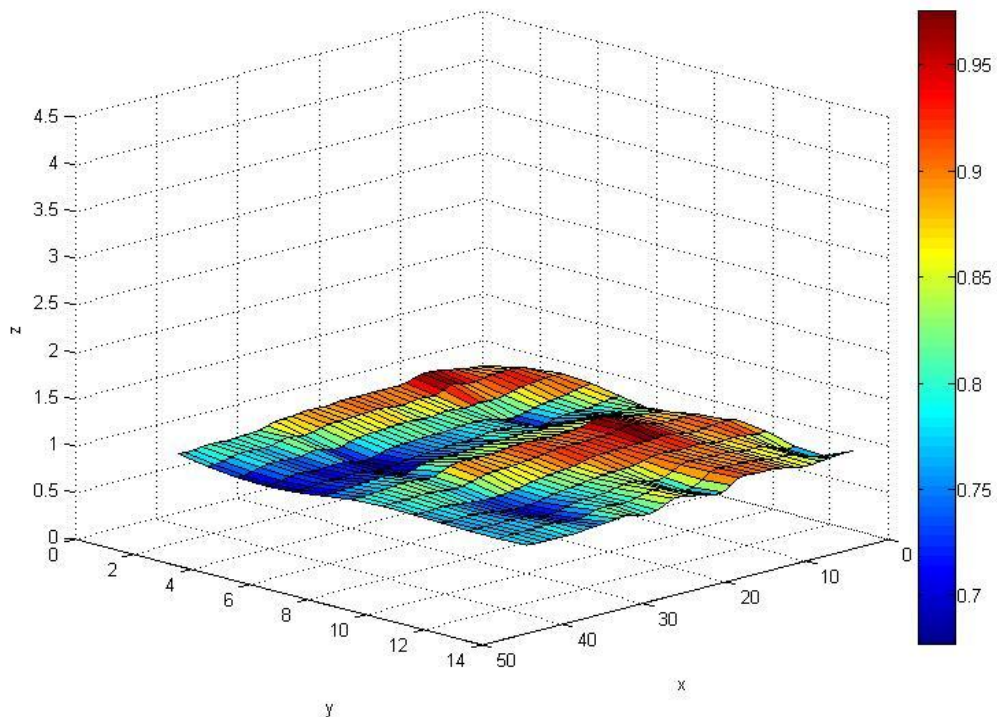
**Obrázok 14: 2. vzorka germánia cez infračervenú kameru**



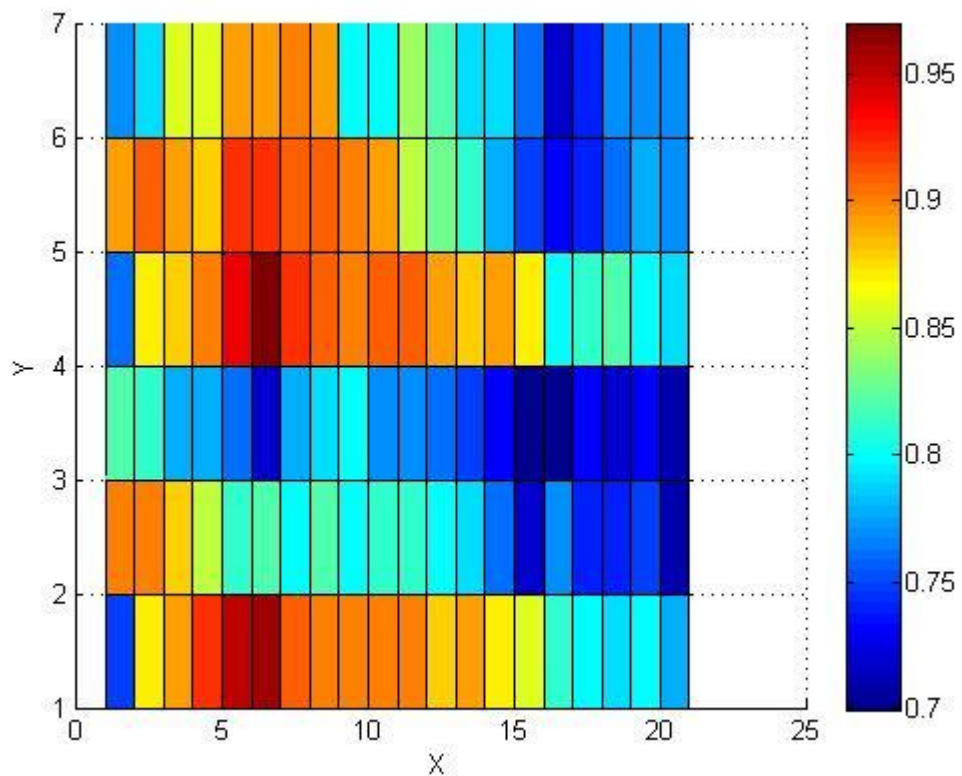
**Obrázok 15: Príklad porovnania homogenity nameraných hodnôt 1. a 2. doštičky pre vybrané miesto vzorku**

### 5.3.3. Tretia planparalelná doštička

Tretia doštička bola vyrobená z čistejšieho germánia určeného pre výrobu optických komponentov. Nebola vyleštená a obsahovala minimum prímеси. Doštička bola zapojená podobným spôsobom (viď. kapitola 5.1.) ako v predchádzajúcom prípade. Táto doštička vykazovala menšiu nehomogenitu ako prvé, avšak ku okraju už sa prejavila mierna nehomogenita, ktorú však môžeme zanedbať.

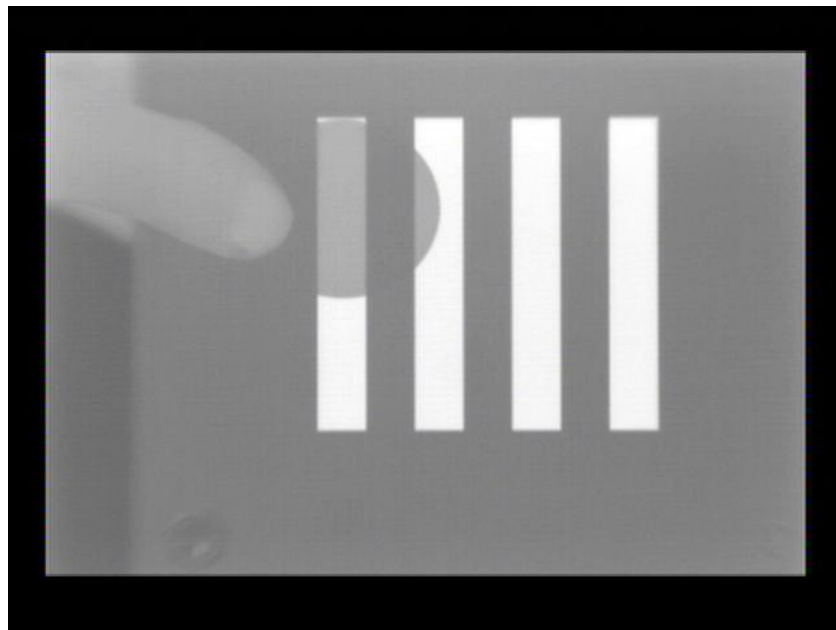


Obrázok 16: 3D znázornenie nameraných hodnôt 3. vzorku germánia



**Obrázok 17: 2D znázornenie nameraných hodnôt 3. vzorku germánia**

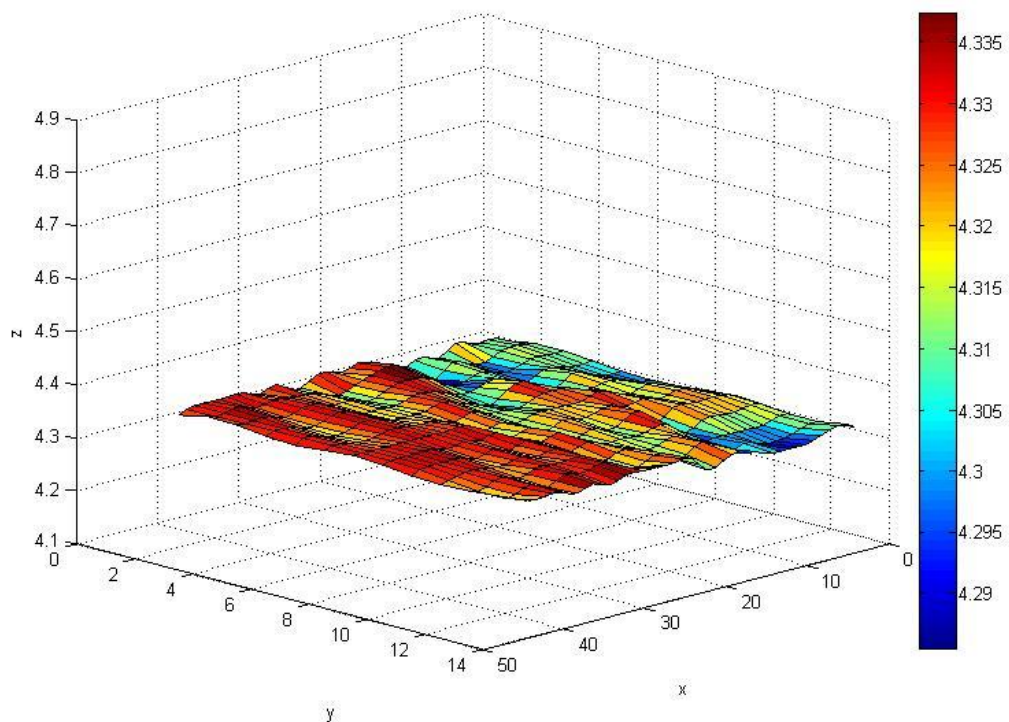
Pri tretom kontrolnom meraní doštička vykazovala omnoho lepšie výsledky ako predchádzajúce germániové doštičky. Jej nehomogenita bola nižšia ako pri predchádzajúcich doštičkách a jej absorpcia vykazovala lepšie hodnoty.



**Obrázok 18: 3. vzorka germánia cez infračervenú kameru**

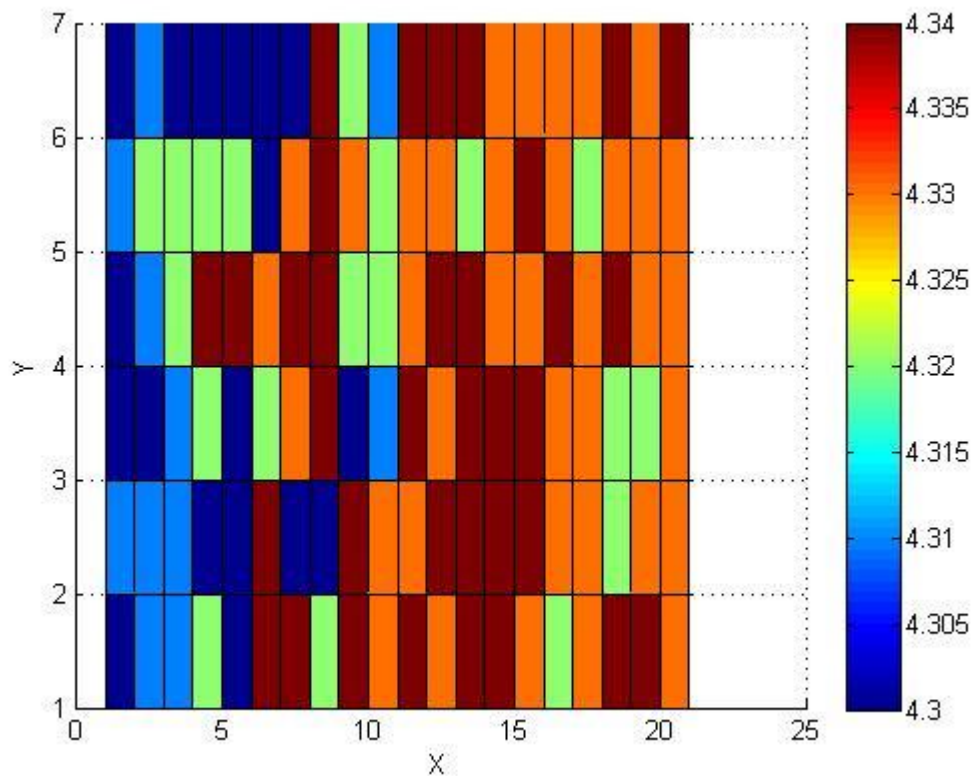
### 5.3.4. Štvrtá planparalelná doštička

Posledná doštička germánia bola vyrobená z čistého lešteného germánia, ktorá neobsahovala žiadne prímеси. Takto kvalitné germánium sa používa v priemysle na výrobu optických komponentov. Pri konštantnom tlaku a stálom napätí doštička nevykazovala žiadnu nehomogenitu, popřípade úplne minimálnu, ktorú však môžeme zanedbať.



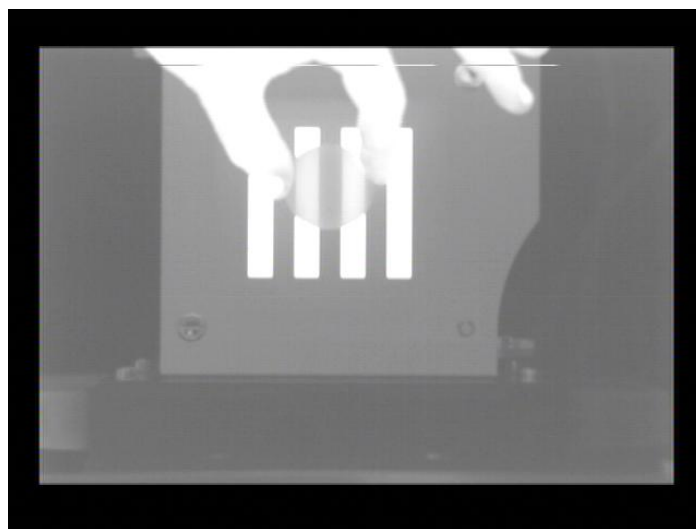
Obrázok 19: 3D znázornenie nameraných hodnôt 4. vzorku germánia



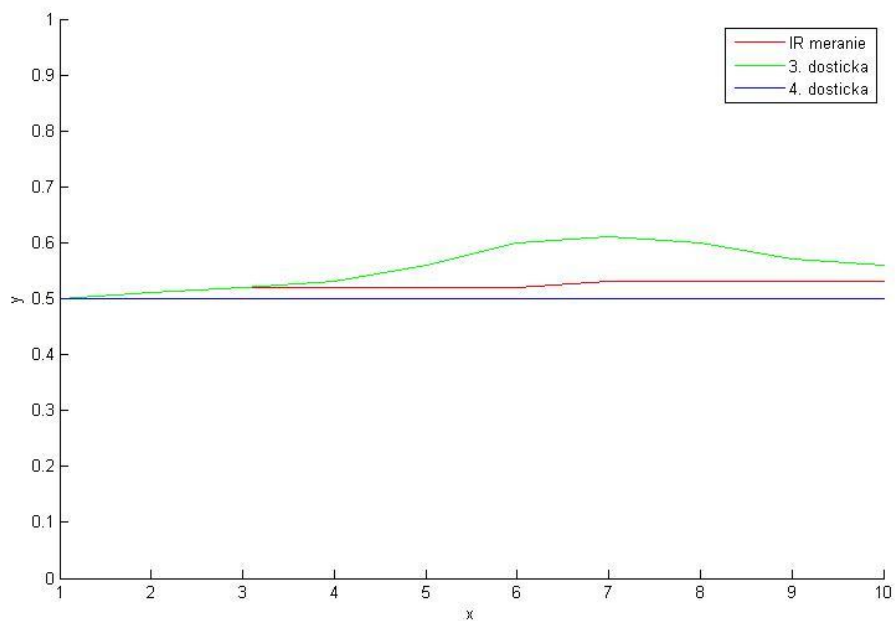


**Obrázok 20: 2D znázornenie nameraných hodnôt 4. vzorku germánia**

Pri kontrolnom meraní doštička vykazovala najlepšie hodnoty. Mala najnižšiu nehomogenitu a najnižšiu absorpciu. Zo všetkých doštičiek mala najlepšie výsledky. Absorpciu mala viditeľne nižšiu ako pri predchádzajúcich troch doštičkách.



**Obrázok 21: 4. vzorka germánia cez infračervenú kameru**



**Obrázok 22: Príklad porovnania homogenity nameraných hodnôt 3. a 4. doštičky pre vybrané miesto vzorku, IR meranie pre 4. doštičku**

**Tabuľka 1: Porovnanie hodnôt u jednotlivých vzorkách**

Číslo vzorku	Stredná hodnota merného odporu	Stredná hodnota absorpcie	Miera nehomogenity (smerodajná odchýlka)
<b>1</b>	24,81	0,98	6,20
<b>2</b>	7,79	0,84	0,19
<b>3</b>	0,82	0,54	0,06
<b>4</b>	0,84	0,48	0,01

## Záver

V dnešnej dobe, kedy sa technológie vyvíjajú, sa hľadajú nové materiály použiteľné v širšej škále spektra. Hľadajú sa práve také materiály, ktoré majú využitie nielen vo viditeľnom spektre, ale ich účinnosť zasahuje aj do infračervenej oblasti spektra. Takýmto materiálom je práve germánum.

Táto bakalárska práca sa zaoberala polovodičovými materiálmi, najmä germániom, rozpracovaním metódy zisťovania homogenity materiálu s využitím závislosti medzi rezistivitou (merným odporom) a optickou homogenitou materiálu. Cieľom práce bolo premerať u dodaných vzorkách planparalelnej doštičky germánia s rôznou homogenitou odpor a zistiť, ako veľmi sa homogenita mení pri rôznych tvaroch a prímiesiach v materiáloch. Za týmto účelom bolo využité skonštruované zariadenie.

Ďalej cieľom tejto práce bolo vytvoriť vhodné laboratórne podmienky na pracovisku, na ktorom boli uskutočnené merania homogenity konkrétneho vzorku germánia.

Práca mala dve časti. Prvá časť sa zaoberá teoretickými znalosťami a vlastnosťami polovodičov, predovšetkým optickými a elektrickými. Druhá časť tejto práce je venovaná samotnému meraniu a zhrnutiu výsledkov. V tejto časti sú popísané použité metódy merania, prístroje a vykonané samotné meranie.

Z merania vyplýva, že rôzne prímеси v materiáloch majú negatívny vplyv na optické vlastnosti materiálu, pričom tvar materiálu nemá žiadny vplyv.

Z metód merania bola najpresnejšia metóda merania pomocou infračervenej kamery. Táto metóda je bezdotyková, preto všetky chyby merania boli minimalizované, teda bola najpresnejšia. Takisto sa minimalizovali chyby pri manipulácii s germániovou doštičkou, ako napríklad odtlačky prstou či poškodenie povrchu doštičky. Toto meranie je vyhovujúce pre opracované materiály.

Meranie pomocou Wheatsonova mostíka je síce zaťažené pri jednorazovom meraní väčšou chybou, oproti priamemu optickému meraniu však nevyžaduje špeciálne a drahé zariadenie (infračervená kamera). Chybu merania je možné znížiť štatistickými metódami (viacnásobným opakovaným meraním). Preto je táto metóda vhodná pre základnú kontrolu

homogenity, poprípade pre detekciu lokálnych (nebodových) nehomogenýt materiálu. V prípade potreby je možné i túto metódu vhodne kombinovať s optickou.

Merania pomocou voltampérovej metódy bolo zo všetkých meraní najmenej presné. Pri tomto type sa najviac prejavili chyby merania. Táto metóda merania je vhodná len pre prípadné základné rozlíšenie materiálu s výraznými nehomogenitami.

Výsledky elektrického merania homogenity sa veľmi dobre zhodujú výsledkom kontrolného merania pomocou IR kamery. Najpresnejšie výsledky malo meranie pomocou Wheatsonovho mostíka, ktoré odporúčam pri ďalšom meraní.

V prílohe tejto práce sú porovnané výsledky zo všetkých meraní.

## Použité zdroje a literatúra

- [1] Dr. Ing. Zdeněk Řehoř: Fyzika polovodiču
- [2] Robert E. Fischer/ Biljanatadic-Galeb: Optical system design, Optical engineering IR materials.
- [3] <https://www.reading.ac.uk/infrared/library/infraredmaterials/ir-infraredmaterials-ge.aspx>
- [4] Frank,H.: Fyzika a technika polovodičov, SNTL Praha, 1990, ISBN: 80-03-00401-2
- [5] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Germanium>
- [6] <https://sk.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8D>
- [7] <https://www.viktorbabjak.cz/public/documents/practical/prak2-04-meranie-malych-odporov.pdf>
- [8] <http://www.posterus.sk/?p=12108>
- [9] Kol.: Elektrotechnická měření. BEN – technická literatúra, Praha 2002.
- [10] <http://nika.informacie.sk/protokoly/08%20Meranie%20R/Meranie%20R%20VA%20metodu/03.pdf>
- [11] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/Electron\\_shell\\_032\\_germanium.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/Electron_shell_032_germanium.png)
- [12] <http://www.netcam.cz/encyklopedie-ip-zabezpeceni/img/svetelne-spektrum.jpg>
- [13] [https://sk.wikipedia.org/wiki/Infra%C4%8Derven%C3%A9\\_%C5%BEiarenie](https://sk.wikipedia.org/wiki/Infra%C4%8Derven%C3%A9_%C5%BEiarenie)
- [14] [https://sk.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9\\_spektrum](https://sk.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum)
- [15] <http://www.tonko.eu/ele/sites/default/files/Wheatstoneov%20most%C3%ADk.png>

[16] <https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQPgEBvVZ3ZsbKf1pFE4ale3-irBwqCW2bgaKbZ1w7jlrDXq3S6Kg>

[17] <http://image.slidesharecdn.com/elektrochemie-091111025214-phpapp02/95/che-07-elektrochemie-52-638.jpg?cb=1389252290>

[18] <http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Tonhauser/fz.html>

[19] [https://sk.wikipedia.org/wiki/Mern%C3%BD\\_elektrick%C3%BD\\_odpor](https://sk.wikipedia.org/wiki/Mern%C3%BD_elektrick%C3%BD_odpor)

[20] [http://elektro.tzbnfo.cz/download.py?file=docu/texty/0001/000103\\_elektrotechnologie\\_demo.pdf](http://elektro.tzbnfo.cz/download.py?file=docu/texty/0001/000103_elektrotechnologie_demo.pdf)

[21] [https://www.google.cz/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwinq6OLq97MAhXMBBoKHSjBABgQjRwIBw&url=http%3A%2F%2Fwww.altechna.com%2Fproduct\\_details.php%3Fid%3D48&psig=AFQjCNHM\\_-D4K-2mDahCgdm9zVnDgKyYXQ&ust=1463477332868935](https://www.google.cz/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwinq6OLq97MAhXMBBoKHSjBABgQjRwIBw&url=http%3A%2F%2Fwww.altechna.com%2Fproduct_details.php%3Fid%3D48&psig=AFQjCNHM_-D4K-2mDahCgdm9zVnDgKyYXQ&ust=1463477332868935)

## Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Pásová štruktúra polovodiča typu P [17] .....	9
Obrázok 2: Pásová štruktúra polovodiča typu N [17].....	10
Obrázok 3: Pásmové modely pevných látok, a) vodič b) vlastný vodič c) izolant [18] .....	12
Obrázok 4: Spektrum svetla [12] .....	16
Obrázok 5: Rozloženie elektrónov v germániu [11].....	18
Obrázok 6: Spektrálna závislosť germánia (T- vnútorná priepustnosť) [21] .....	20
Obrázok 7: Schéma merania pomocou voltampérovej metódy[16] .....	22
Obrázok 8: Schéma merania pomocou Wheatsonovho mostíku [15].....	23
Obrázok 9: 3D znázornenie nameraných hodnôt 1. vzorky germánia.....	26
Obrázok 10: 2D znázornenie nameraných hodnôt 1. vzorky germánia.....	26
Obrázok 11: 1. vzorka germánia cez infračervenú kameru .....	27
Obrázok 12: 3D znázornenie nameraných hodnôt 2. vzorky germánia.....	28
Obrázok 13: 2D znázornenie nameraných hodnôt 2. vzorky germánia.....	28
Obrázok 14: 2. vzorka germánia cez infračervenú kameru .....	29
Obrázok 15: Príklad porovnania homogenity nameraných hodnôt 1. a 2. doštičky pre vybrané miesto vzorku.....	29
Obrázok 16: 3D znázornenie nameraných hodnôt 3. vzorky germánia.....	30
Obrázok 17: 2D znázornenie nameraných hodnôt 3. vzorky germánia.....	31
Obrázok 18: 3. vzorka germánia cez infračervenú kameru .....	31
Obrázok 19: 3D znázornenie nameraných hodnôt 4. vzorky germánia.....	32
Obrázok 20: 2D znázornenie nameraných hodnôt 4. vzorky germánia.....	33
Obrázok 21: 4. vzorka germánia cez infračervenú kameru .....	33
Obrázok 22: Príklad porovnania homogenity nameraných hodnôt 3. a 4. doštičky pre vybrané miesto vzorku.....	34

## Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Porovnanie hodnôt u jednotlivých vzorkách.....	34
Tabuľka 2: Namerané hodnoty 1. germániovej doštičky pomocou volampérovou metódou .....	41
Tabuľka 3: Vypočítané hodnoty extinkcie 1. doštičky .....	41
Tabuľka 4: Vypočítané hodnoty absorpcie 1. doštičky .....	41
Tabuľka 5: Namerané hodnoty 2. doštičky voltampérovou metódou .....	42
Tabuľka 6: Vypočítané hodnoty extinkcie 2. doštičky .....	42
Tabuľka 7: Vypočítané hodnoty absorpcie 2. doštičky .....	42
Tabuľka 8: Namerané hodnoty 3. germániovej doštičky pomocou Wheatsonovho mostíka .....	43
Tabuľka 9: Vypočítané hodnoty extinkcie 3. doštičky .....	43
Tabuľka 10: Vypočítané hodnoty absorpcie 3. doštičky .....	43
Tabuľka 11: Namerané hodnoty 4. germániovej doštičky pomocou Wheatsonovho mostíka .....	44
Tabuľka 12: Vypočítané hodnoty extinkcie 4. doštičky .....	44
Tabuľka 13: Vypočítané hodnoty absorpcie 4 doštičky .....	44



# Prílohy

Príloha 1: 1. vzorka germánia

**Tabuľka 2: Namerané hodnoty 1. germániovej doštičky pomocou volampérovou metódou**

Namerané hodnoty 1. germániovej doštičky																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<b>0</b>	27	27,8	28,6	28	28,6	24,1	22,4	24,6	26,7	25,1	24,5	22,7	21,7	24,8	26	25,3	23,4
<b>5</b>	12	11,9	11,5	25,7	22,1	16,1	11,4	12,1	12,6	11,2	10,9	10	9,7	15,7	18,9	15,7	11,4
<b>10</b>	28	28,9	27,7	31,3	30,1	30,4	27,8	25,8	21,2	26,2	29,9	30	30,1	25,4	12,8	12,7	12,6
<b>15</b>	30	29,4	27,2	30,4	35	27,6	24	25,6	27	29,4	31,4	32,6	34,6	33,8	32,1	31,5	30,3
<b>20</b>	25,8	28,4	28,4	27,3	26,5	24,8	23,7	25,8	27,9	28,4	28,7	29,3	29,4	28,4	29,1	29,7	30,1
<b>25</b>	24,1	25,4	29,3	29,7	31,7	32	31,9	31,4	30	29,7	27,6	33,4	30,1	29,3	33	27,6	23,6
<b>30</b>	21,5	21,8	22,5	21,5	21,6	21,7	21,7	21,6	21,8	22	21,9	21,7	21,6	21,5	21,4	21,4	21,3

Poznámka 4: stredná hodnota: 24,8151, smerodajná odchýlka: 6,2083

**Tabuľka 3: Vypočítané hodnoty extinkcie 1. doštičky**

Vypočítané hodnoty extinkcie																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>0</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3
<b>5</b>	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
<b>10</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2
<b>15</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
<b>20</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>25</b>	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3
<b>30</b>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Poznámka 5: stredná hodnota: 0,3494, smerodajná odchýlka: 0,0874

**Tabuľka 4: Vypočítané hodnoty absorpcie 1. doštičky**

Vypočítané hodnoty absorpcie																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>0</b>	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,9	3,2	2,9	2,7	2,8	2,9	3,1	3,3	2,9	2,7	2,8	3,0
<b>5</b>	5,9	6,0	6,2	2,8	3,2	4,4	6,2	5,9	5,6	6,3	6,5	7,1	7,3	4,5	3,8	4,5	6,2
<b>10</b>	2,5	2,5	2,6	2,3	2,4	2,3	2,6	2,8	3,4	2,7	2,4	2,4	2,4	2,8	5,5	5,6	5,6
<b>15</b>	2,4	2,4	2,6	2,3	2,0	2,6	3,0	2,8	2,6	2,4	2,3	2,2	2,1	2,1	2,2	2,3	2,3
<b>20</b>	2,8	2,5	2,5	2,6	2,7	2,9	3,0	2,8	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4	2,5	2,4	2,4	2,4
<b>25</b>	2,9	2,8	2,4	2,4	2,2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,4	2,6	2,1	2,4	2,4	2,2	2,6	3,0
<b>30</b>	3,3	3,3	3,2	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3

Poznámka 6: stredná hodnota: 3,1462, smerodajná odchýlka: 1,2061

**Tabuľka 5: Namerané hodnoty 2. doštičky voltampérovou metódou**

Namerané hodnoty 2. germániovej doštičky																					
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	8,1	7,9	8,1	8	8,1	8,1	8,2	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
5	8	8	8	8	8,1	8	8	8	8	8,1	7,9	8	8	8	8,1	8	8	8	8	8	8
10	7,8	7,8	7,8	7,8	8	8	8	8	8	8	8	8	7,8	7,8	7,9	7,9	7,7	7,7	7,8	7,8	7,7
15	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,8	7,7	7,7	7,7	7,8	7,8	7,7	7,7	7,7
20	7,7	7,6	7,7	7,7	7,6	7,7	7,8	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,6	7,7	7,7	7,7	7,6	7,6	7,5	7,6	7,5
25	7,6	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7	7,6	7,6	7,6	7,5	7,7	7,6	7,6	7,6	7,6
30	7,5	7,6	7,6	7,5	7,6	7,6	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,7	7,6	7,7	7,6	7,7	7,7	7,5	7,4	7,4

Poznámka 1: stredná hodnota: 7,7946, smerodajná odchýlka: 0,1979

**Tabuľka 6: Vypočítané hodnoty extinkcie 2. doštičky**

Vypočítane hodnoty extinkcie																					
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
25	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Poznámka 2: stredná hodnota: 0,1098, smerodajná odchýlka: 0,0028

**Tabuľka 7: Vypočítané hodnoty absorpcie 2. doštičky**

Vypočítane hodnoty absorpcie																					
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	8,8	9,0	8,8	8,9	8,8	8,8	8,7	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,9	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
5	8,9	8,9	8,9	8,9	8,8	8,9	8,9	8,9	8,9	8,8	9,0	8,9	8,9	8,9	8,8	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
10	9,1	9,1	9,1	9,1	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	9,1	9,1	9,0	9,0	9,2	9,2	9,1	9,1	9,2
15	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	9,1	9,2	9,2	9,2	9,1	9,1	9,2	9,2	9,2
20	9,2	9,3	9,2	9,2	9,3	9,2	9,1	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	9,3	9,2	9,2	9,2	9,3	9,3	9,5	9,3	9,5
25	9,3	9,5	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,2	9,2	9,2	9,2	9,3	9,3	9,3	9,5	9,2	9,3	9,3	9,3	9,3
30	9,5	9,3	9,3	9,5	9,3	9,3	9,5	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	9,2	9,3	9,2	9,3	9,2	9,2	9,5	9,6	9,6

Poznámka 3: stredná hodnota: 9,1173, smerodajná odchýlka: 0,2301

Príloha 3 : 3. vzorka germánia

**Tabuľka 8: Namerané hodnoty 3. germániovej doštičky pomocou Wheatsonovho mostíka**

Namerané hodnoty 3. germániovej doštičky																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0,75	0,9	0,9	0,92	1	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,88	0,89	0,87	0,86	0,81	0,8	0,79
5	0,9	0,9	0,9	0,85	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,79	0,76	0,72	0,77	0,74	0,74
10	0,82	0,8	0,8	0,78	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,76	0,75	0,73	0,7	0,7	0,73	0,72
15	0,76	0,9	0,9	0,9	0,9	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,89	0,88	0,89	0,87	0,8	0,81	0,82
20	0,89	0,9	0,9	0,88	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,83	0,81	0,78	0,76	0,73	0,74	0,76
25	0,77	0,8	0,9	0,86	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8	0,82	0,8	0,79	0,76	0,72	0,74	0,77
30	0,88	0,9	0,9	0,85	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,87	0,79	0,78	0,82	0,8	0,79	0,77

Poznámka 7: stredná hodnota: 0,8231, smerodajná odchýlka: 0,0662

**Tabuľka 9: Vypočítané hodnoty extinkcie 3. doštičky**

Vypočítane hodnoty extinkcie																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
15	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
20	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
25	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
30	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Poznámka 8: stredná hodnota: 0,0116, smerodajná odchýlka: 7,0133

**Tabuľka 10: Vypočítané hodnoty absorpcie 3. doštičky**

Vypočítane hodnoty absorpcie																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	94,7	81,6	79,8	77,2	74,8	74,0	78,0	78,9	78,9	78,9	78,9	80,7	79,8	81,6	82,6	87,7	88,8
5	78,9	78,9	80,7	83,6	87,7	86,6	88,8	86,6	88,8	87,7	87,7	88,8	89,9	93,4	98,6	92,2	96,0
10	86,6	87,7	91,1	91,1	93,4	98,6	91,1	89,9	88,8	92,2	92,2	93,4	94,7	97,3	101,5	101,5	97,3
15	93,4	81,6	80,7	78,9	75,6	73,2	77,2	78,0	78,9	78,0	78,0	79,8	80,7	79,8	81,6	88,8	87,7
20	79,8	78,0	79,8	80,7	77,2	77,2	78,0	78,0	78,9	79,8	83,6	85,6	88,2	91,1	94,1	97,3	96,0
25	92,2	89,9	82,2	82,9	79,8	79,8	78,9	79,8	88,8	80,7	84,5	86,6	88,9	89,9	93,4	98,6	96,0
30	80,7	80,7	82,2	83,2	80,7	78,0	78,0	78,0	88,8	86,6	83,6	81,6	89,8	91,1	86,6	88,8	89,9

Poznámka 9: stredná hodnota: 86,8408, smerodajná odchýlka: 7,0133

**Tabuľka 11: Namerané hodnoty 4. germániovej doštičky pomocou Wheatsonovho mostíka**

Namerané hodnoty 4. germániovej doštičky																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	4,3	4,4	4,2	4,1	4,3	4,4	4,5	4,3	4,4	4,3	4,4	4,5	4,4	4,5	4,3	4,5	4,6	4,5
5	4,4	4,3	4,2	4,3	4,3	4,4	4,3	4,3	4,4	4,5	4,6	4,5	4,4	4,5	4,4	4,3	4,3	4,2
10	4,3	4,2	4,1	4,2	4,3	4,2	4,3	4,4	4,5	4,4	4,6	4,5	4,6	4,5	4,4	4,3	4,3	4,2
15	4,5	4,6	4,5	4,5	4,4	4,3	4,4	4,4	4,3	4,3	4,5	4,6	4,5	4,3	4,3	4,4	4,3	4,4
20	4,4	4,3	4,2	4,1	4,2	4,3	4,3	4,4	4,3	4,4	4,3	4,3	4,2	4,3	4,4	4,3	4,3	4,3
25	4,3	4,4	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,4	4,3	4,5	4,5	4,6	4,5	4,3	4,3	4,3	4,5	4,4
30	4,4	4,4	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,2	4,3	4,3

Poznámka 10: stredná hodnota: 4,4, smerodajná odchýlka: 0,1106

**Tabuľka 12: Vypočítané hodnoty extinkcie 4. doštičky**

Vypočítané hodnoty extinkcie																		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
25	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Poznámka 11: stredná hodnota: 0,1, smerodajná odchýlka: 0,0016

**Tabuľka 13: Vypočítané hodnoty absorpcie 4 doštičky**

Vypočítané hodnoty absorpcie																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	16,5	16,1	16,9	17,3	16,5	16,1	15,8	16,5	16,1	16,5	16,1	15,8	16,1	15,8	16,5	15,8	15,4
5	16,1	16,5	16,9	16,5	16,5	16,1	16,5	16,5	16,1	15,8	15,4	15,8	16,1	15,8	16,1	16,5	16,5
10	16,5	16,9	17,3	16,9	16,5	16,9	16,5	16,1	15,8	16,1	15,4	15,8	15,4	15,8	16,1	16,5	16,5
15	15,8	15,4	15,8	15,8	16,1	16,5	16,1	16,1	16,5	16,5	15,8	15,4	15,8	16,5	16,5	16,1	16,5
20	16,1	16,5	16,9	17,3	16,9	16,5	16,5	16,1	16,5	16,1	16,5	16,5	16,9	16,5	16,1	16,5	16,5
25	16,5	16,2	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,1	16,5	15,8	15,8	15,4	15,8	16,5	16,5	16,5	15,8
30	16,1	16,1	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,9	16,5

Poznámka 12: stredná hodnota: 16,3, smerodajná odchýlka: 0,4